

REFRAKCIJSKI VPLIVI PRI NIVELMANU

dr. Aleš Breznikar

FAGG-Oddelek za geodezijo, Ljubljana

Prispelo za objavo: 27.5.1994

Izvleček

Predstavljen je problem nivelmanske refrakcije. Opisane so dosedanje raziskave in predstavljeni trije različni pristopi k reševanju problema refrakcije. Podan je tudi konkreten izračun velikosti refrakcijskega vpliva za eno stojišče instrumenta.

Ključne besede: nivelman, nivelmanska refrakcija, lomni količnik, statistična analiza, temperaturni gradient

Abstract

The levelling refraction problem is presented. The past and present research is described and three different approaches to refraction problem solving presented. The concrete calculation of the size of a refraction influence to one levelling instrument station point is given.

Keywords: levelling, levelling refraction, refractive index, statistical analysis, temperature gradient

1. UVOD

Podobno kot pri drugih merskih tehnikah v geodeziji je tudi razvoj pri nivelmanu dosegel raven, ko predstavlja vpliv atmosfere glavni omejitveni dejavnik pri doseganju še višje natančnosti meritev. Z vsesplošnim razvojem se pojavlja vedno več geofizikalnih problemov, pri katerih je pomembno natančno določanje višinske razlike med točkami na zemeljski površini. Med te probleme spada določanje dejanske oblike Zemlje, ugotavljanje odklona težiščnice in njene odvisnosti od razporejenosti zemeljskih mas, ugotavljanje premikov zemeljske skorje, reševanje oceanografskih problemov ali pa precizno niveliranje za potrebe državnih nivelmanskih mrež. Pri reševanju teh problemov moramo pri meritvah upoštevati tudi refrakcijski vpliv, če želimo dobiti rezultate, ki z visoko natančnostjo odražajo dejansko stanje.

Posledice vpliva atmosfere na nivelmansko vizuro imenujemo vertikalna refrakcija, oziroma glede na specifične pogoje merjenja pri nivelmanu (mala višina nad tlemi in relativno kratka dolžina vizure), tudi nivelmanska refrakcija. Pri merjenju višinskih razlik z nivelirjem pri enakih dolžinah vizure vpliv refrakcije pri odčitkih na obeh latah ni enak, zato v tem primeru govorimo tudi o diferencialni refrakciji. Ta neenakost refrakcijskega vpliva je posebno izrazita v obdobju stanja atmosfere, ki ga imenujemo nestabilna stratifikacija.

2. DOSEDANJE RAZISKAVE VPLIVA NIVELMANSKE REFRAKCIJE

S problemi vpliva okoliške atmosfere na geodetske meritve so se ukvarjali že v preteklosti. Nemški geodet Stampfer je že leta 1845 opozoril, da vertikalna refrakcija kvari rezultate niveliranja. Prve teoretične raziskave refrakcije pri niveliranju je opravil Lallemant leta 1896. Na osnovi svojih raziskav je razvil logaritmico relacijo med temperaturo t in višino h . Vendar njegovi rezultati niso bili nikoli uporabljeni v praksi. So pa še danes v veljavi nekatera njegova spoznanja, ki jih geodeti vključujejo v nove teorije o nivelmansi refrakciji. V letih 1938-39 je opravil raziskave nivelmanske refrakcije Kukkamaki, ki je svoja teoretična spoznanja uporabil tudi v praksi. Zaključki njegovih teoretičnih spoznanj so bili, da je vpliv refrakcije na rezultate niveliranja minimalen. Kljub temu, da je razvil primerne metode za računanje refrakcijskih korekcij, le-te niso bile vsesplošno uporabljene v nivelmanskih mrežah. Še do pred nekaj desetletij so strokovnjaki v svojih raziskavah podobno kot Kukkamaki, prihajali do zaključkov, da ti vplivi na meritve niso prevladujoči. Natančnost modelov, s katerimi so opisovali dogajanja v atmosferi in njihov vpliv na geodetske meritve, je bila v okviru natančnosti merskega instrumentarija. V zadnjih dveh desetletjih pa je bil razvoj instrumentarija veliko hitrejši, kot so prihajala nova in natančnejša spoznanja o dogajanjih v atmosferi, na osnovi katerih bi bilo mogoče oceniti njihov vpliv na posamezne meritve. Vzrok temu je predvsem v kompleksnosti atmosfere, ki je zelo hitro se spreminjajoč sistem, odvisen od celega niza količin. Vse to zelo otežuje kvalitetno modeliranje sistema brez zelo natančnih in dragih meritev posameznih parametrov, ki nastopajo v atmosferi.

V sedemdesetih letih so se kopičile evidence o sistematičnih pogreških pri niveliranju. To se je pokazalo kot primer pri razhajanju med nagnjenostjo površine morja, določeno z nivelmanom, in oceanografskimi metodami. V zadnjih desetletjih so geodeti začeli uvajati spoznanja o nivelmansi refrakciji v svoje meritve. Predlagani modeli nivelmanske refrakcije še vedno niso dovolj zanesljivi, hkrati pa zahtevajo dodatne meritve meteoroloških parametrov, kar zahteva dodatno opremo in podaljšuje čas meritev. Vse skupaj pa bistveno vpliva na ceno opravljenih meritev.

3. NAČINI REŠEVANJA PROBLEMA NIVELMANSKE REFRAKCIJE

Refrakcija je sedaj prepoznana kot glavni izvor sistematičnih pogreškov pri niveliranju. Raziskave opravljajo predvsem kot del ponovnih izmer državnih nivelmanskih mrež. Dosedanje raziskave nivelmanske refrakcije in njenega vpliva na rezultate niveliranja so pokazale, da so ti vplivi majhnega velikostnega reda. Vendar pa je problematičen predvsem sistematični del teh vplivov, ki ga ni mogoče zaznati z raznimi analizami rezultatov niveliranja, ampak se nam direktno pokaže v izmerjeni višini posamezne višinske točke. Ker je način merjenja pri nivelmanu sestavljen iz velikega števila ponavljanj enega merskega postopka, se pod določenimi pogoji ti sistematični vplivi seštevajo in rezultat je nepravilna višina točke, katere pogrešek bistveno presega natančnost nivelmana.

Raziskovanje nivelmanske refrakcije je do sedaj potekalo predvsem v treh različnih smereh:

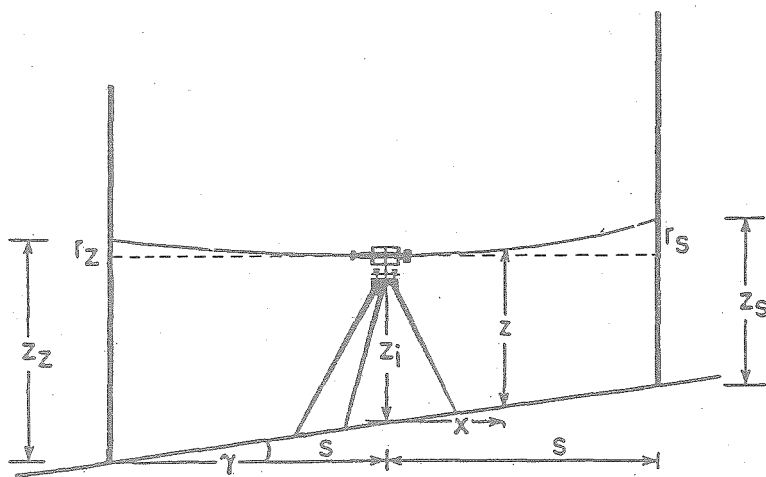
- Direktno preučevanje fizikalnih procesov v mejnih plasteh atmosfere, ki jih seka nivelmanska vizura. Iz tega lahko potem razvijamo modele, na osnovi katerih lahko sklepamo na refrakcijsko korekcijo. Največji problem pri tem je

kompleksnost narave in fizikalnih procesov v nižjih plasteh atmosfere. Refrakcija je pod vplivom številnih integracijskih faktorjev, kot so: temperatura, temperaturni gradient, tlak, zračna vlaga, vsebnost CO₂ v zraku in procesov, ki so povzročitelji sprememb naštetih vplivnih količin: radiacije sonca, vetra, oblačnosti in površine, nad katero niveliramo. Vse te parametre je zelo težko meriti in jih povezovati med sabo.

- Drugi pristop k temu problemu je statistično raziskovanje rezultatov v nivelmanskih mrežah. Osnovna predpostavka je naslednja: Če so opazovanja pod vplivom refrakcije, se efekti pokažejo v rezultatih opazovanj. Te efekte lahko skozi statistično analizo ugotavljamo in eliminiramo.
- Tretji pristop pri teh raziskavah bazira podobno kot prvi na atmosferski fiziki. Pri tem predpostavimo statični medij in jemljemo v račun efekte turbulence na nivelmansko vizuro. Brunner (Brunner 1984) je na tej predpostavki pokazal, kako zagotovimo indirektno metodo za določanje vertikalne refrakcije. V teh primerih je termična stabilnost podana na osnovi ocen. Ta način veliko obeta v prihodnosti predvsem zaradi svoje relativne enostavnosti.

3.1. Modeli nivelmanske refrakcije na osnovi funkcije temperaturne spremembe z višino

Ti modeli izhajajo iz skupne osnove, ki je podana z vplivom temperaturnega gradienta na lomni količnik zraka in predpostavke, da so izotermične plasti vzporedne s tlemi.



Slika 1

z_s, z_z : čitanje na latak -spredaj -zadaj

z_i : višina instrumenta

s : dolžina vizure

x : spremenljivka dolžine vzdolž vizure

γ : kot nagiba terena glede na horizont, hkrati tudi kot izotermičnih plasti glede na horizont

r_s, r_z : sprememba odčitka zaradi refrakcije.

Merjeno višinsko razliko ($\Delta h'$) med lato spredaj in zadaj lahko zapišemo:

$$\Delta h' = z_z - z_s \quad (1)$$

Pravo višinsko razliko (Δh) pa dobimo, če upoštevamo korekcijo zaradi vpliva refrakcije:

$$\Delta h = (z_z - r_z) - (z_s - r_s) \quad (2)$$

$$\Delta h = \Delta h' - r \quad (3)$$

V enačbi (3) predstavlja r popravek vpliva refrakcije na višinsko razliko enega stojišča nivelirja. Enak je razliki refrakcijskih popravkov na posameznih latic:

$$r = r_z - r_s \quad (4)$$

Osnovna enačba, na osnovi katere računamo refrakcijske popravke nivelmanske vizure, je izpeljana iz lomnega zakona pri prehodu vizure iz ene v drugo izotermično plast.

$$r_{s,z} = -\operatorname{ctg}^2 \gamma D \int_{z_i}^{z_{s,z}} \Delta t \, dz \quad (5)$$

Tu pomeni:

z_i : višina pri instrumentu

$z_{s,z}$: višina pri latic spredaj oziroma zadaj

D : faktor vpliva temperaturnih sprememb na lomni količnik.

$$D = 10^{-6} (0,933 - 0,0064 (t - 293 \text{ K})) \frac{p}{1013}$$

pri čemer je:

t : temperatura v K

p : zračni tlak v mbar.

Različni modeli se razlikujejo v različnih izrazih za temperaturno spremembo Δt z višino (z). Različni avtorji so na osnovi meritev razvili različne enačbe za spremembo temperature z višino. Najpomembnejše so naslednje:

1. Bestova enačba, ki je osnova za Kukkamakijev refrakcijski model:

$$\Delta t = b (z_1^c - z_2^c) \quad (6)$$

2. Reissmannova enačba:

$$\Delta t = b (z_1 - z_2) + c (z_1^2 - z_2^2) \quad (7)$$

3. Lallemandova enačba:

$$\Delta t = b \log \frac{z_1 + c}{z_2 + c} \quad (8)$$

Parametra b in c v zgornjih enačbah sta dobljena na osnovi meritev temperature na dveh ali več višinah. Pri tem je največji problem zanesljivost teh parametrov, saj morajo odražati dejansko stanje atmosfere v času čitanja na latic.

3.2 Statistična analiza

Pri statistični analizi nivelmanskih rezultatov lahko ugotovimo, da sta v rezultatih niveliranja prisotna tako slučajni kot sistematični pogrešek. Glede na to, da skušamo z uvedbo popravkov zaradi vpliva refrakcije pri nivelmanskih merjenjih odpraviti predvsem sistematični del pogreška zaradi refrakcije, je smiselno, da rezultate niveliranja statistično obdelamo in skušamo ugotoviti, kolikšen je delež sistematičnega pogreška v skupnem pogrešku.

Določanje nivelmanske refrakcije iz izravnave je razvil Remmer (Remmer 1982). Priporočil je, da namesto prevzema refrakcijske korekcije, ki bazira na temperaturnih meritvah, uporabimo enačbe opazovanj, ki vsebujejo refrakcijsko korekcijo:

$$E(\Delta z_i) = H_i - H_{i-1} + \left(\sum s^2 \Delta z \right) h_1 + \left(\sum s^2 \Delta z^3 \right) h_2 \quad (9)$$

pri čemer je:

Δz_j : višinska razlika med dvema reperjema

Δz : višinska razlika na enem stojišču z dolžino s

H_i, H_{i-1} : višine točk na koncu sekcije

h_1, h_2 : konstanti, dobljeni iz izravnave.

Konstanti sta definirani z naslednjima izrazoma:

$$h_1 = \frac{1}{6} \left(\frac{dn}{dt} \right) \left(\frac{d^2 t}{dz^2} \right) \quad (10)$$

$$h_2 = \frac{1}{480} \left(\frac{dn}{dt} \right) \left(\frac{d^4 t}{dz^4} \right) \quad (11)$$

$\frac{dn}{dt}$: sprememba lomnega količnika s spremembo temperature

$\frac{d-t}{d-z}$: sprememba temperature z višino.

Pri običajnem načinu izravnave ima enačba (9) samo člen $H_i - H_{i-1}$ na desni strani.

Komentarji na Remmerjeve raziskave so bili zelo različni. Sam je o svojih raziskavah dajal zelo pozitivne in prepričljive izjave. Rezultati njegovih testiranj nivelmanskih mrež so se dejansko izboljšali z uvedbo korekcij s koeficienti, dobljenimi pri izravnavi. Vendar pa to še ni pozitiven dokaz. Prej bi lahko zaključili, da to dovoljuje sklep, da ima ta način izravnave pozitivne učinke v posameznih primerih. Remmerjev način statistične obdelave rezultatov niveliranja ima s stališča ugotavljanja pogreška zaradi vpliva refrakcije predvsem dve pomanjkljivosti:

- Obravnava le pogrešek zaradi vpliva refrakcije, ki se pokaže v posameznih pogojih nivelmanskih meritev: zapiranje nivelmanskih zank in odstopanja med niveliranjem v eno in drugo stran. Ne odpravimo pa na ta način pogreška zaradi vpliva refrakcije, ki se odraža direktno v pogrešku višine posameznih točk. Tako ne moremo na ta način odpraviti celotnega sistematičnega vpliva tega pogreška.
- Prav tako ne moremo celotnega pogreška, ki ga dobimo iz statistične analize, pripisati refrakcijskim vplivom. Pri takšnem načinu obdelave podatkov se pokažejo tudi še drugi sistematični vplivi, s katerimi se srečujemo pri niveliranju.

3.3 Indirektni model popravka zaradi vpliva refrakcije

Pri prejšnjih enačbah za nivelmansko refrakcijo so bile te enačbe izražene v enotah gradienta refraktivnosti, ki je funkcija temperaturnega gradienta. Temperaturni gradient pa lahko izrazimo v enotah meteoroloških parametrov v odvisnosti od višine nad tlemi, oziroma privzete temperaturne funkcije. E.K. Webb je prvi pokazal, da bi bilo praktično zelo ugodno računati temperaturni gradient v mejah meteoroloških parametrov. Enačbe so bile razvite v okviru obsežnih raziskovanj atmosferske turbulence in toplotne uravnoteženosti v mejnih plasteh. Enačbe, ki bazirajo na preprosti osnovni teoriji, so bile razvite na osnovi zelo zahtevnih in preciznih meteoroloških meritev. Pri tem je pomembno, da razlikujemo dve tipični atmosferski stanji: stabilno in nestabilno s srednjim nevtralnim stanjem. Kadar so tla segreta, se zaradi konvekcije toplota dviguje v obliki turbulentnih vrtincev v ozračje. Atmosfera se tako meša in je nestabilna, temperaturni gradient pa je negativen. Pri pozitivnem temperaturnem gradientu pa hladen zgoščen zrak leži na tleh in ni tendence, da bi se mešal. To imenujemo stabilno stanje. Webb je tudi pokazal, kako pri nestabilnem stanju obstajajo plasti, ki so odvisne od mehanizmov turbulence. Globina plasti se spreminja v odvisnosti od jakosti vetra in drugih parametrov. Če vzamemo kot primer za merjenje: sončen dan, kar pomeni nestabilno stanje, potem velja v tej plasti atmosfere, skozi katero poteka nivelmanske vizura, naslednja zveza:

$$\frac{dt}{dz} = - \left(\frac{H^2 t_0}{(c_p \rho)^2 g} \right)^{1/3} z^{-4/3} \quad (12)$$

pri čemer je:

$\frac{dt}{dz}$: temperaturni gradient

H : količina toplotne energije, ki jo nosi konvektivni toplotni tok

c_p : specifična toplota pri konstantnem tlaku v zraku

ρ : specifična teža zraka

g : gravitacijski pospešek

t_0 : srednja vrednost temperature zraka v spodnjih plasteh.

Toplotni tok (H) je eden najbolj značilnih meteoroloških parametrov, vendar pa ga ne moremo meriti direktno. Angus Leppan (1979) je pokazal, kako lahko določimo toplotni tok na tri možne načine. Pri tem je za praktično uporabo najbolj zanimiv način izračuna toplotnega toka direktno iz merjenih temperaturnih razlik ($t_2 - t_1$) na različnih višinah (z_1, z_2) po naslednji enačbi:

$$0,078 H^{2/3} = \frac{(t_2 - t_1) + 0,01 (z_2 - z_1)}{z_2^{-1/3} - z_1^{-1/3}} \quad (13)$$

Glavna prednost načina izračuna refrakcijskega vpliva po indirektni metodi je v tem, da lahko velikost toplotnega toka z dovolj visoko natančnostjo ocenimo na osnovi preprostih opazovanj: oblačnosti, vetra, vrste podlage, pokritosti z vegetacijo, naklon terena, smer niveliranja. Vendar pa so za izdelavo kvalitetnih modelov potrebna obsežna predhodna merjenja.

4. VELIKOST REFRAKCIJSKEGA VPLIVA

Pri praktičnem izračunu velikosti refrakcijskega vpliva se rezultati razlikujejo glede na to, katerega izmed modelov uporabimo. Razlike v izračunih med posameznimi modeli sicer niso velike, posebno še, če so meteorološki pogoji pri merjenju normalni. Poglejmo si praktičen izračun velikosti temperaturnega gradienta pri naslednjih pogojih (glej sliko 1):

$z_s = 0,50$ m
 $z_z = 2,50$ m
 $z_i = 1,50$ m
 $s = 40$ m
 $p = 1013$ mb
 $t = 20^0$ C (293 K)

$dT/dz = -0,25$ K/m; kar je povprečen temperaturni gradient za september med 8. in 9. uro dopoldne ob sončnem vremenu, dobljen na osnovi praktičnih meritev v Sloveniji. Velikosti refrakcijskih vplivov, ki jih dobimo z zgornjimi podatki, so naslednje:

model	r_s (mm)	r_z (mm)	r (mm)
Kukkamakijev	0,150	0,064	0,086
indirektni	0,142	0,062	0,080

Pri zgornjem izračunu refrakcijskega vpliva je treba poudariti, da so velikosti odčitkov pri latah in dolžina vizure maksimalne vrednosti, ki jih lahko srečamo pri preciznem nivelmanu, če upoštevamo pravilnike, medtem ko so vrednosti temperaturnega gradienta povprečne. Maksimalne vrednosti temperaturnega gradienta med letom dosežejo tudi -0,8 do -1,0 K/m.

5. ZAKLJUČEK

Veliko avtorjev je do zdaj raziskovalo vpliv refrakcije. Praktični eksperimenti so pokazali, da so rezultati različnih enačb podobni in so blizu realnim vrednostim. Cilj uvedbe refrakcijskih korekcij v nivelmanske meritve je predvsem odprava sistematičnega dela refrakcijskega pogreška. Korekcije bi morale temeljiti na moduliranih temperaturnih gradientih ali na merjenih temperaturnih razlikah. Rezultati bi bili v obeh primerih lahko zadovoljivi. Vendar imata obe metodi svoje pomanjkljivosti:

- pri uporabi merjenih temperaturnih razlik so potrebna precizna merjenja temperature, kar ni lahko doseči, hkrati pa merjenje temperature obremenjuje nivelmanske meritve,
- pri uporabi ustreznih modelov za indirektno metodo izračuna refrakcijskega vpliva pa so potrebne obsežne raziskave za izdelavo modelov, ki bi v naših klimatskih pogojih z zadovoljivo natančnostjo opisovali različna stanja atmosfere.

Literatura:

- Breznikar, A., 1993, *Izbira najprimernejše metode izračuna nivelmanske refrakcije v naših klimatskih razmerah*, Doktorska disertacija, FAGG-Oddelek za geodezijo, Ljubljana.
- Brunner, F.K., 1984, *Geodetic Refraction*, Springer Verlag Berlin, Berlin.
- Kakkuri, J., 1988, *A Physical Model Developed for Computing Refraction Coefficients*, DGK Reihe B, Muenchen, No. 287, 235-239.
- Pelzer, H., 1982, *Error Propagation in Levelling Networks*, Veroff, DGK Reihe B, Hannover, Heft 258/V, 104-114.
- Remmer, O., 1982, *Nonrandom Effects in the Finnish Levelling of High Precision*, Manuscripta Geodaetica, Vol. 7, No. 6, 353-373.
- Remmer, O., 1984, *Refraction und andere systematische Effekte im Nivellement*, Verm.wes. und Raumordnung, 46. Jahrg., Berlin, Nu. 2, 69-78.

Recenzija: dr. Božo Koler
Miro Logar